УДК 550.389+502.8.903

О ФИЛЬТРАЦИИ МАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ГЛУБИНЕ ПОСРЕДСТВОМ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРОДОЛЖЕНИЯ В ПОЛЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

О.А. Черная, Ю.И. Дубовенко

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, Киев 03680, Украина, e-mail: oksana_chornaya@mail.ru, nemishayeve@ukr.net

На основе анализа магнитных данных для парка Pineview 30×80 м осуществлён пересчёт вверх магнитных аномалий с целью их археологического истолкования. Аналитическое продолжение позволило разделить аномалии по глубинности источников.

Определены контуры аномалий на основе расчета поля от источников в эквивалентном слое с помощью вычисления разностного поля от аномальных границ источников.

Дополнительный расчёт горизонтального градиента магнитной индукции дал возможность уточнить классификацию локальных аномалий по амплитуде. Результаты интерпретации имеют качественный характер, но позволили локализовать места раскопов.

Ключевые слова: археология, магнитометрия, аналитическое продолжение, тонкослоистая среда, эквивалентные источники.

Актуальность задачи. Неразрушающим методам изучения археологических объектов, в т.ч. геофизическим, нет альтернативы при обнаружении археологических объектов, установлении их структуры – без их вскрытия. Наличие геофизических аномалий обусловлено контрастом физических свойств грунтов и искомых объектов (намагниченности в случае с магнитной съёмкой). Малоглубинная геофизика хорошо зарекомендовала себя при археологических исследованиях благодаря высокой стабильности результатов. Вариация содержания магнитных минералов на несколько процентов может в несколько раз и порядков изменить намагниченность грунта и создать заметную аномалию магнитного поля. Магнитная съемка многих поселений эпохи бронзы на Южном Урале («Аркаим», «Каменный Амбар», «Сарым-Саклы», «Воровская Яма») [1,4,6,7,10], Трипольского поселения в Украине («Глыбочок») [3] хорошо зарекомендовала себя при картировании фортификаций и интерьера городищ, вследствие наличия в культурном слое обожжённых глин и других грунтов с магнитными свойствами, повышенными по сравнению с окружающими почвами.

Магнитометрическая съёмка археологических объектов выполняется обычно по сети от 1×1 м до 4×4 м в пределах планшетов размером от 50×50 м до 100×100 м. В каждой точке наблюдений измеряется модуль магнитной индукции B геомагнитного поля. Точность отсчета применяемых для археологических исследований протонных и квантовых магнитометров не превышает ± 1-2 нТ, среднеквадратическая погрешность съёмки – не превосходит 2-5 нТ. Минимальная амплитуда уверенно выделяемых локальных магнитных аномалий – на уровне $A_{\min}$ = 3 е, т. е. 6-12 нТ [3].

Чтобы надёжно воссоздать строение археологического объекта, нужно решить обратную задачу магнитометрии. Однако в силу некорректности обратной задачи интерпретация полученных материалов оказывается неоднозначной. Особенно неблагоприятными для изучения являются среды с малыми по сравнению с глубиной залегания геометрическими размерами (большое влияние принципа эквивалентности) и контрастными электромагнитными свойствами (экранные эффекты). Дополнительные трудности связаны с техническими, природными и геологическими помехами. Выделение на их фоне полезных аномалий требует применения специальной аппаратуры с высокой помехозащищенностью и накоплением сигналов, а также статистических способов обработки информации [5].

На стадии первичной обработки магнитометрических данных необходимо выполнить процедуру уравнивания системы планшетов, т.е. привести магнитное поле участка съёмки к единому уровню [2]. Уравнённое таким образом магнитное поле представимо суммой трёх составляющих:

$$B(x) = A(x) + R(x) + P(x), \tag{1}$$

где $A(x)$ – локальные аномалии от археологических объектов; $R(x)$ – региональное поле геологической природы; $P(x)$ – аномалии-помехи в результатах наблюдений, связанные с погрешностью магнитометров, недоучётом короткопериодических вариаций магнитного поля, магнитными неоднородностями верхнего слоя почвы и археологических объектов. Наблюдённое магнитное поле, в котором проявляются одновременно все типы аномалий, имеет сложный характер и малопригодно для уверенного выделения археологических объектов.

Задача состоит в том, чтобы *выделить все искомые аномалии* (в том числе и мелкие) *в чистом виде и представить их в наглядной форме.* Для этого нужно выполнить две процедуры: снятие (исключение) регионального фона и фильтрацию помех.

Выделение локальных аномалий. Для разделения региональных и локальных аномалий могут быть использованы различные методы:

1. усреднение наблюдённого поля;
2. вычисление вариаций магнитного поля по Б. Андрееву;
3. корреляционный метод: определение и исключение тренда (линейного/нелинейного регионального поля);
4. аналитическое продолжение аномалий в верхнее полупространство и вычисление остаточных аномалий;
5. выделение регионального поля с помощью фильтров, подавляющих локальные аномалии и помехи.

Подобные преобразования (трансформации) проводят как по площади, так и по профилям. При выборе площадного или профильного варианта трансформаций учитывают особенности фона помех. Каждый из упомянутых методов имеет как свои преимущества, так и недостатки. В работе [3] произведена количественная характеристика различных методов выделения локальных магнитных аномалий. При сравнении всех полученных результатов установлено, что метод выделения локальных аномалий, основанный на тренд-анализе исходных данных, выгодно отличается от других рассмотренных методов и его можно рекомендовать как лучшее средство разделения локальных и региональных аномалий при обработке материалов магнитометрических съемок археологических объектов. Недостатком же корреляционного метода является то, что в процессе расчета локальных аномалий фильтрации помех не происходит. Поэтому следующая задача обработки состоит в том, чтобы подавить помехи, максимально сохранив полезные аномалии. Отмечено также, что приемлемые результаты можно получить на основе пересчета наблюденного поля в верхнее полупространство или применением энергетического фильтра. При пересчете вверх методом аналитического продолжения аномалий в верхнее полупространство узкие крутые локальные аномалии и помехи быстро затухают – и это, на наш взгляд, неоспоримое преимущество этого метода.

Плавные широкие региональные аномалии с небольшим градиентом поля уменьшаются с высотой значительно более медленно. Поэтому на некоторой высоте H над уровнем наблюдений сохраняется главным образом региональная компонента поля, хотя и несколько ослабленная.

Нами изучена возможность использования фильтрации с помощью аналитического продолжения в верхнее полупространство в качестве способа разделения возмущающих источников на различных глубинах [14]. Сделан ряд допущений об упрощённом рассмотрении геологической среды. Главное, что следует иметь в виду, что грави- и магнитные данные не содержат *явно* информации о глубине источников аномалий.

Вследствие решения соответствующей прямой задачи всегда можно создать любую модель наблюдённого поля по распределению значений намагниченности (или плотности) на поверхности измерений. Но такое формальное математическое решение лишь в исключительных случаях будет иметь *геологически значимое* содержание. Исходя из этого, в качестве модели среды использовано семейство *взаимно не коррелируемых* распределений *тонкослоистых источников* с целью решения прямой задачи – вычисления модели поля. Следствием этого решения является эквивалентный набор шаблонов полезного сигнала. Такой приём означает, что поля, вычисленные для разных значений глубин источников, имеют нулевую корреляцию. Это условие не столь сурово, как кажется, поскольку множество распределений неоднородности во вмещающей среде, вообще говоря, могут иметь как положительную, так и отрицательную корреляцию. Вследствие этого допущение о нулевой корреляции – частный случай нейтрального распределения. В физическом смысле, подобные распределения представляют собой слои с эквивалентными источниками, и к их обработке можно привлечь соответствующие методы фильтрации по эквивалентным источникам.

Модификация метода исследования. Предлагается следующий алгоритм восстановления потенциального поля по эквивалентному распределению источников:

1. *Извлечение регионального фона* от источников, находящихся на глубине h_0, путём аналитического продолжения наблюдённого поля на высоту $2h_0$ по известным соотношениям. В спектральной области оптимальный фильтр для такой операции:

$$F_r(x) = e^{(-2x \cdot h_0)}, \tag{2}$$

легко реализуется в среде MatLab 2011;

2. *Нахождение разностного поля* остаточных аномалий путём извлечения регионального поля из полного магнитного поля (легко осуществимо в среде Origin 9);
3. *Вычисление намагниченности* в заданной области от слоя *эквивалентных источников,* располо-

женного *между* глубинами h_1 и h_2, путём вычисления разницы операторов аналитического продолжения вверх на высотах $2h_2$ и $2h_1$ (вычисление разности от пересчёта вверх сдвоенных значений соответствующих глубин, в спектральной области оптимальный фильтр для такой операции:

$$F_{sl}(x) = e^{(-2x\cdot h_1)} - e^{(-2x\cdot h_2)}. \quad (3)$$

4. *Фильтрация аномалий*. Аномалии, имеющие источник внутри слоя эквивалентных источников, выделяются более рельефно после фильтрации (исполненной в Cooper's SignProc 1.56).

Следует учитывать, что в слабоградиентном мозаичном поле, осложнённом резкими структурными несогласиями, определённость в зависимости "аномалия – глубина" теряется. Рекомендуем использовать альтернативные методы фильтрации (гармонический анализ [13], фильтры Винера [9]).

Пример обработки экспериментальных данных. Изложенный выше способ качественной фильтрации магнитных аномалий применим к обработке данных полного магнитного поля, полученных при детальном исследовании археологического объекта в Pineview парке (США). Исходные данные получены из репозитория www.ngdc.noaa.gov.

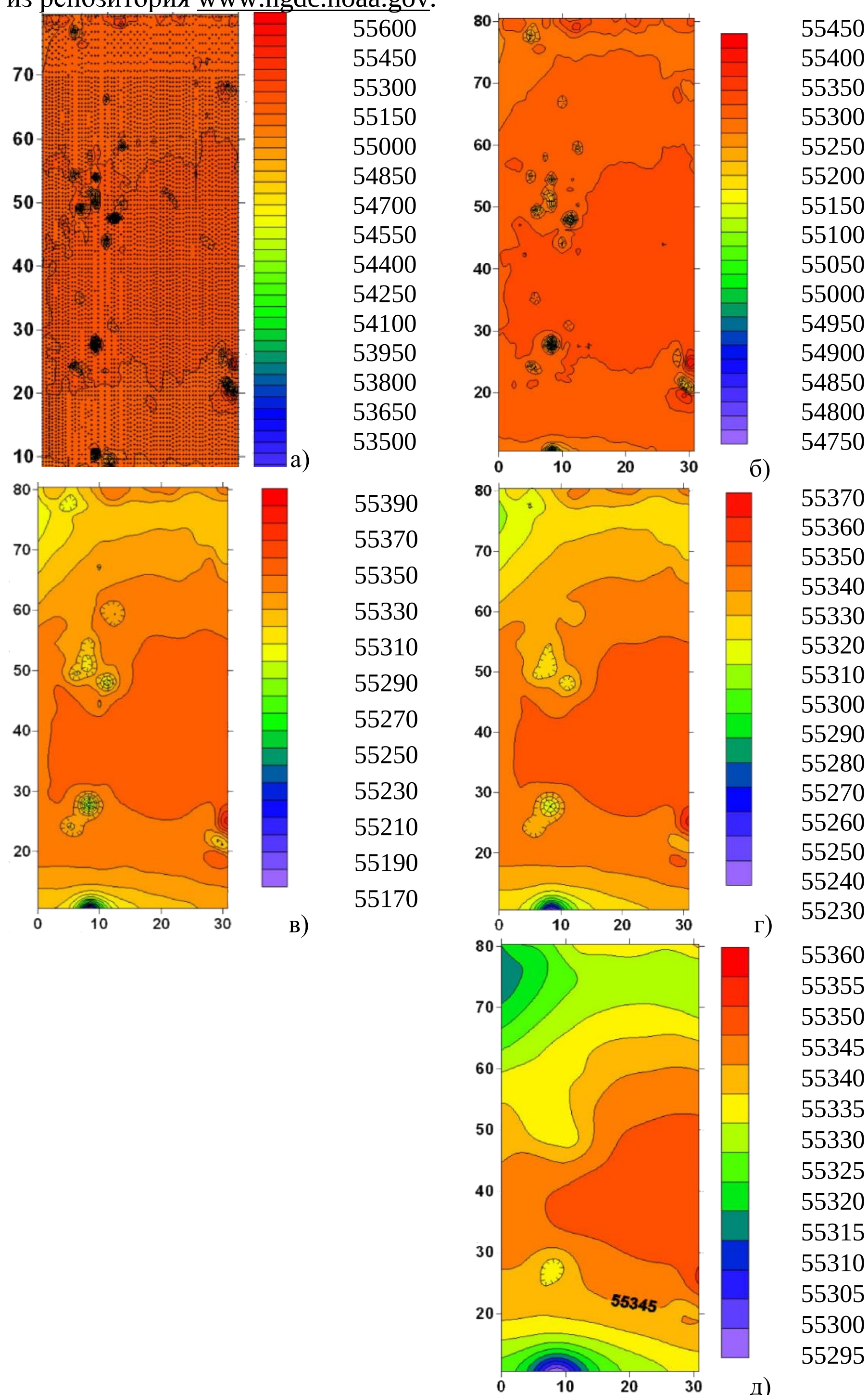


Рис.1. а). – Исходные данные (аномалия полного магнитного поля ΔT в нТ) и результаты его продолже-

ния вверх б). – на 0.5 м; в). – на 1.5 м; г). – на 2 м; д). – на 4 м.

Здесь реализован поэтапный пересчёт аномалий полного магнитного поля вверх на высоты 0.5, 1.5, 2 и 4 м соответственно (рис.1) на равнинном участке территории парка 30×80 м (горизонтальный масштаб дан в м, магнитная индукция – в нТ, контуры изолиний проведены через 25 нТ). Пересчёт осуществляется с целью подавить коротковолновой шум и выделить локальные аномалии.

Черные точки на рис.1.а) обозначают расположение пунктов измерений с магнитометром. При этом на рис.1.б)-1.д) нижний край участка обрезан из-за высоко-градиентного шума (близость к металлической ограде, исключено из анализа), а также исключены (пропущенные точки) некоторые наблюдения на профилях из-за низкого качества. Повторить наблюдения невозможно из-за изменения технологических условий (раскопы, обводнение и т.п.). Даже в период измерений многие аномалии из интересующего нас метрового диапазона, попали в проблемные по условиям измерений зоны.

Магнитные аномалии, рассчитанные от слоя эквивалентных источников в SignProc 1.56 [11,12] путём дифференцирования, продлённого на соответствующий уровень магнитного поля между уровнями 0.5÷1.5 м, 1÷2 м, и 2÷4 м представлены на рис. 2. Слои заданных источников априори содержат коррелируемые решения. Краткий качественный анализ полученного поля позволяет предположить, что наибольший интерес с точки зрения планируемых раскопок представляют аномалии, с центрами в координатах (по сети участка) *x*, *y* = 8, 50; 8, 28; 30, 22. Эти три аномалии либо содержат заметное количество магнитного материала возле поверхности (2÷4 м), либо вызваны возмущающими телами, расположенными на значительной глубине (17-20 м под поверхностью).

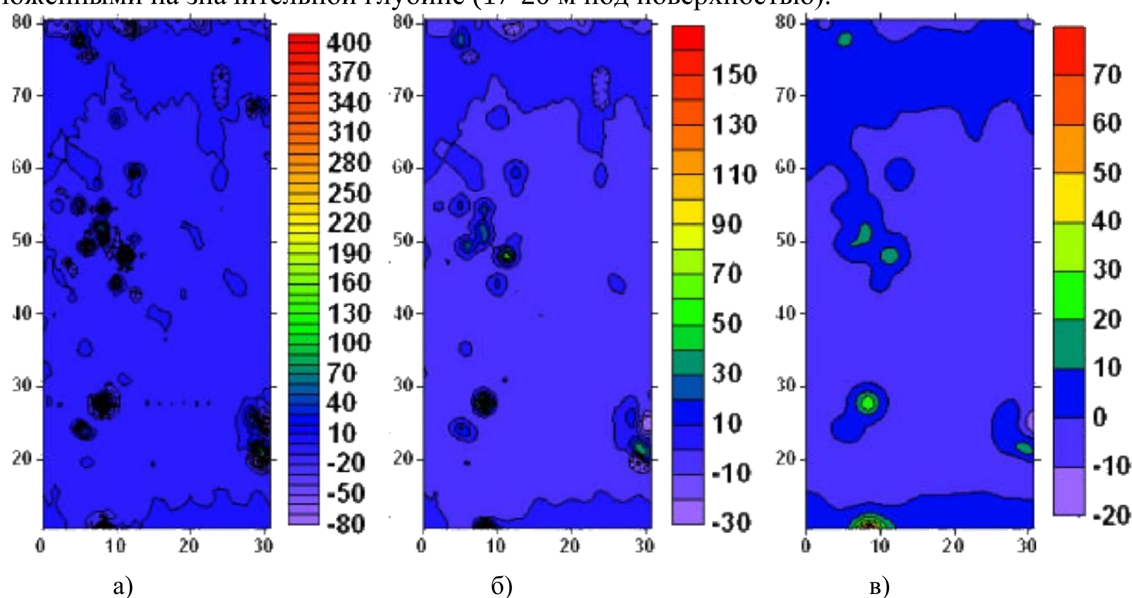


Рис. 2. Магнитные аномалии, рассчитанные от слоя эквивалентных источников в слоях а). – 0.5÷1.5 м, б). – 1÷2 м, в). – 2÷4 м.

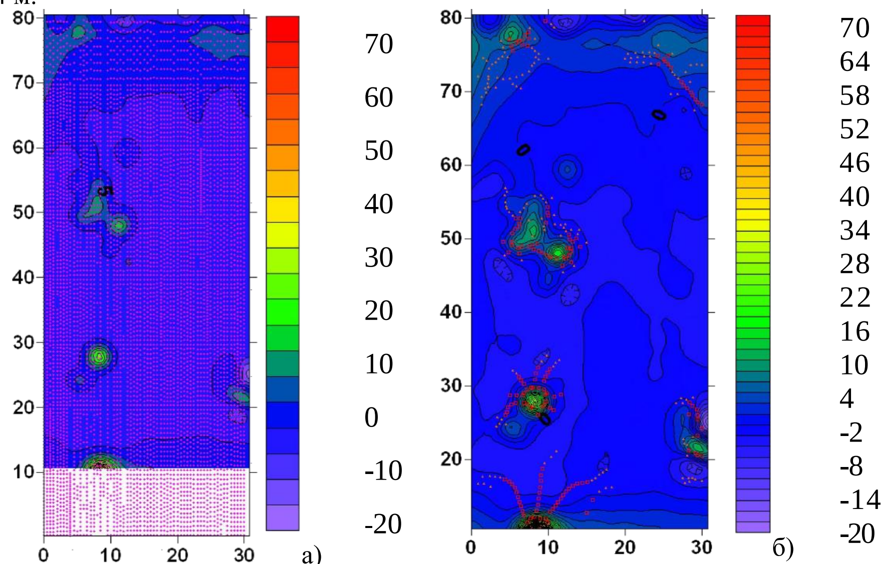


Рис. 3. а) Наложение сети наблюдений исходного магнитного поля на результат его трансформации в поле эквивалентных источников; б) поле эквивалентных источников с повышенной детальностью.

Обсуждение и анализ результатов. Качественный анализ исходного поля (рис.1.а) и его трансформаций (рис.1.б) -1.д)) подтвердил, что, в общем случае, продолжение вверх на величину, равную шагу по профилю (0.5 м), не даёт значительную “прибавку” в разрешении, но иногда значительно снижает высокочастотный (коротковолновой) шум.

Наложение сети точек наблюдений (рис. 1) на те же точки значений магнитного поля (рис. 2в), полученные при расчёте прямого эффекта от слоя эквивалентных источников на интервале глубин 1÷2 м (рис. 3) показало, что следует с крайней осторожностью трактовать две большие аномалии на западном краю участка карты. Хотя большинство точек наблюдений и подтверждают эти аномалии, их качественный анализ показывает большую вероятность глубинного происхождения аномальных источников. К тому же, они сильно коррелируются с профилями наблюдений, на которых исключено много (15%) наблюдений с повышенным шумом.

Последующее наложение значений магнитного поля, рассчитанных на том же интервале глубин 1÷2 м расположения слоя эквивалентных источников, но с большей детальностью (рис. 3б), контур через 2 нТ) подтверждает предыдущий вывод. Здесь точки указывают максимальные значения горизонтального градиента поля. По их расположению можно качественно оценить положение границ возмущающих тел ниже поверхности наблюдений. В данном случае, особенности поля возле северного края карты, менее выражены со сжатым контуром и подчёркнуты значительной величиной горизонтального градиента магнитного поля. Это означает меньшую вероятность содержательного истолкования (сомнительные источники).

Альтернативные исследования. В работе [4] исследована возможность восстановления модели магнитных свойств ниже поверхности наблюдений на основе решения обратной задачи магнитометрии с помощью адаптивного метода Кочнева (в программе ADGM-3D). Авторами успешно восстановлена послойная магнитная восприимчивость для модели из 3 слоёв. Эту методику можно рекомендовать для параллельного контроля вычислений.

Детальное исследование [3] обосновывает методику восстановления магнитных свойств приповерхностных объектов геологической среды по данным магнитометрии (модуля магнитной индукции *B* геомагнитного поля). В этой работе исследованы различные методы разделения аномалий (усреднение; вычисление вариаций; исключение регионального фона; аналитическое продолжение вверх и вычисление остаточных аномалий; фильтрация регионального фона). Количественная характеристика этих методов локализации магнитных аномалий позволяет установить, что наиболее предпочтителен корреляционный метод выделения локальных аномалий, основанный на тренд-анализе исходных данных. Он наименее подвержен погрешностям, и рекомендован в [3] как лучшее средство разделения локальных и региональных аномалий при обработке материалов магнитометрических съёмок археологических объектов.

Особый интерес представляет приём, описанный в [3], который используется для оценки достоверности (надёжности) выявленных аномалий – метод обратной (условной) вероятности [8]. Сущность метода состоит в том, что выделенные локальные аномалии, осложнённые помехами, сравнивают с условно принятым сигналом заданной формы. Это может быть кривая, представленная 5-7 точками наблюдений, имеющая 1 максимум (объект небольших горизонтальных размеров), 2 максимума (широкий объект), знакопеременная или другой формы. Чем лучше ряд значений поля локальных аномалий в расчётном интервале отвечает форме заданной кривой, тем выше вероятность того, что отмеченная здесь аномалия соответствует искомой.

Так, вероятность наличия аномалии в данной точке профиля оценивается по формулам:

$$V(i)=K(i)/(1+K(i))\cdot 100\,,\quad K(i)=\exp\left(-\frac{1}{2s}\sum_{k=-m}^{+m}A(k)^2\right)\cdot\exp\left(\frac{1}{s}\sum_{k=-m}^{+m}\big(B(i+k)\cdot A(k)\big)\right), \qquad (4)$$

где $K(i)$ – коэффициент правдоподобия, s – дисперсия помех, $B(i+k)$ – значения поля в точках расчетного интервала, равного $\pm m$ точек наблюдений, $A(k)$ – ординаты ожидаемой аномалии.

Эти формулы рассчитывают коэффициенты максимального правдоподобия по сравнению с эталонными аномалиями (рассчитанными от теоретических моделей). Надёжно выявленными считают аномалии с вероятностью более 50%. В нашем случае вероятность выделения “полезной” аномалии составляет 75-100%, а аномалии-помехи – не более 20%.

Выводы. Главным выводом исследования является осознанная необходимость создания общей базы данных по обработке археологических объектов в рамках изучения геологического наследия (геосайтов) Украины по единой государственной программе. Разработать критерии создания подобной базы данных можно в рамках одного-двух межотраслевых совещаний.

Частным выводом относительно исследуемой проблемы является успешная апробация метода аналитического продолжения компонент магнитного поля в поле эквивалентных источников на примере данных для парка Pineview (30×80 м) в целях их археологического истолкования. Разделение аномалий произведено аналитическим продолжением вверх на разные уровни, а расчёт источников в эквивалентном слое – вычислением разностного поля от верхней и нижней аномальных границ источников. Дополнительная информация, использованная для качественного анализа – расчёт горизонтального градиента магнитной индукции с целью уточнения классификации локальных аномалий по амплитуде. Эти преобразования можно дополнять расчётами других характеристик и фильтров, информативных в конкретных условиях применения.

Результаты интерпретации имеют качественный характер, но позволили локализовать места раскопов, рассчитать параметры объектов (намагниченность, глубину залегания, контуры, степень сохранности) с помощью качественного анализа результата решения обратной задачи магнитометрии для однородных тонкослоистых сред.

Литература

1. *Берсенева Н.А., Епимахов А.В., Носкевич В.В., Федорова Н.В.* Возможности синтеза геофизической и археологической информации при интерпретации результатов раскопок (на примере поселения бронзового века Каменный Амбар) // Вестник археологии, антропологии и этнографии. – 2015. – №1(28). С. 4-14.

2. *Дудкін В.П., Жарких М.І., Кошелев І.М.* Первинна обробка результатів магнітометричних спостережень на археологичних пам'ятках // АРОІКС. – Вип. 1. – 1997. – С. 10-18.

3. *Дудкин В.П., Кошелев И.Н.* Комплексная интерпретация магнитометрической съёмки археологических памятников // Вост.- европ. археол. журн. – 2004. – 3(16).

4. *Кочнев В.А., Зданович Г.Б., Пунегов Б.Н.* Опыт применения 3D-технологий интерпретации магнитных полей на археологическом обьекте "Аркаим" / XI Уральская мол. науч. школа по геофизике, 15-19 марта 2010 г., Екатеринбург. – Сб. докл. – Екатеринбург, 2010.

5. *Манштейн А.К.* Малоглубинная геофизика // Пособие по спецкурсу. – Новосибирск, 2002.

6. *Муравьев Л.А., Носкевич В.В., Федорова Н.В.* Результаты магнитометрических исследований археологических памятников эпохи бронзы на Южном Урале // Уральский геофизический вестник. – 2009. – №1(14). – С. 44-49.

7. *Носкевич В.В., Федорова Н.В., Вдовин А.Г.* Геофизические исследования курганных археологических комплексов на Южном Урале // Геофизика. – 2015. – № 2. – С. 23-30.

8. *Тархов А.Г., Сидорова А.А.* О математической обработке геофизических данных // Изв. АН СССР. – Сер. Геофиз. – 1960. – № 10.

9. *Тихоцкий С.А.* Оптимальная по Колмогорову-Винеру интерполяция и фильтрация аномальных полей, измеренных на произвольном множестве точек: теоретические аспекты // Корреляционно-статистические методы обработки и интерпретации геофизических данных: Уч. пос. – Пермь. – 1998.

10. *Федорова Н.В., Носкевич В.В., Иванченко В.С., Бебнев А.С., Маликов А.В.* Геофизические методы исследования археологических памятников Сарым-Саклы и Воровская Яма (Южный Урал) // Уральский геофизический вестник. – 2013. – № 2 (22). – С. 46-53.

11. *Cooper G.R.J.* Gridding Gravity Data Using an Equivalent Layer // Computer and Geosciences. – 2000. – 26. – № 2. – P. 227-233. doi:10.1016/S0098-3004(99)00089-8 (Accessed 15.05.2015).

12. *Cooper G.R.J.* Fixed point inversion of geophysical data // Computer and Geosciences. – 2002. – 28. – Issue 7. – P. 799-808.

13. *Giuli Verbanac*. On regional modeling of the main geomagnetic field // Geofizika. – 2007. – 24, № 1. – P. 1-27.

14. *Jacobsen J.F.* A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps // Geophysics. – 1987. – 52, № 8. – P. 1138-1148.

ПРО ФІЛЬТРАЦІЮ МАГНІТНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ГЛИБИНОЮ ШЛЯХОМ АНАЛІТИЧНОГО ПРОДОВЖЕННЯ В ПОЛІ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ДЖЕРЕЛ

О.А. Чорна, Ю.І. Дубовенко
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, Київ, 03680, Україна, e-mail: oksana_chornaya@mail.ru, nemishayeve@ukr.net

На основі аналізу магнітних даних для парку Pineview 30×80 м здійснений перерахунок вверх магнітних аномалій з метою їх археологічного тлумачення. Аналітичне продовження дозволило розділити аномалії за глибинами джерел. Розрахунок поля від джерел в еквівалентному шарі за допомогою обчислення різницевого

поля від аномальних меж джерел дозволив визначити контури аномалій. Додатковий розрахунок горизонтального градієнта магнітної індукції дав змогу уточнити класифікацію локальних аномалій за амплітудою. Результати інтерпретації мають якісний характер, але дозволили локалізувати місця розкопок.

Ключові слова: археологія, магнітометрія, аналітичне продовження, тонкошарувате середовище, еквівалентні джерела.

ON THE FILTERING OF MAGNETIC SOURCES BY THE DEEP BY THE USE OF ANALYTIC CONTINUATION INTO THE FIELD OF EQUIVALENT SOURCES

Chornaya O.A., Dubovenko Yu.I.
Institute of Geophysics by S.I. Subbotin name of NAS of Ukraine, 32 Palladin Avenue, Kyiv, 03680, Ukraine, email: oksana_chornaya@mail.ru, nemishayeve@ukr.net

Purpose. The research note considers the techniques and methods aimed for the interpretation purposes and location specifications of the archaeological sites within the equivalent layer filtering approach. The problem is as follows, one must outline all the required anomalies (including small) per se and present its in visual form. For this purpose, it is necessary to perform two procedures: removal (exception) of a regional background and noise filtering.
Design/methodology/approach. We studied possibility of using of a filtration by means of analytical continuation in the top half-space as a way of division of the revolting sources at various depths. The following algorithm of restoration of a potential field by the equivalent distribution of sources is offered:

- Elimination of a regional field
- Estimation the residual field anomalies
- Calculation the magnetization
- Filtering of anomalies

There are a number of assumptions involved, and one must keep in mind that magnetic and gravity data contain no inherent information about the depth of source and the observed magnetic field to be the sum of the regional field, the residual field, and aggregate noise. There is used assemblages of mutually uncorrelated thin source distributions at various depths to model the field as equivalent source layers.
Findings. Based on the analysis of magnetic data survey, acquired for a Pineview park of 30×80 m, a paper deals with a calculation in upper space for magnetic anomalies in order to do their archaeological interpretation. An analytical continuation procedure allow us to divide the anomalies by the sources deep. A field calculation from the sources in an equivalent layer by means of calculation of the residual field from the anomalous sources boundaries allow defining the contours of magnetic anomalies. The additional calculation of horizontal gradient of magnetic induction allow us to adjust the classification of local anomalies by the amplitude.
Practical value/implications. The main conclusion of research is the conscious need i creation of the general database on processing of the archaeological objects within studying of geological heritage (geosites) of Ukraine by a uniform state program. Partial conclusion of studied problem is successful approbation of a method for analytical continuation of a components of a magnetic field into the field of equivalent sources within the sample data for Pineview park (30×80 m) to do their archaeological interpretation.
The additional information use for the qualitative analysis is the calculation of the horizontal gradient of the magnetic induction in order to concretize the classification of the local anomalies by the amplitude. The transformation above one can complement with the other filters. The results of interpretation have qualitative character, but allowed to localize the location of excavations.

Keywords: archeology, magnetometry, analytical continuation, thin-layer environment, equivalent sources.

References

1. Berseneva N.A., Epimakhov A.V., Noskevich V.V., Fedorova N.V. *Vozmozhnosti sinteza geofizicheskoy i arkheologicheskoy informatsii pri interpretatsii rezul'tatov raskopok (na primere poseleniya bronzovogo veka Kamennyy Ambar)* [The possibilities of synthesis of geophysical and archaeological information by the interpretation of excavation results (on the example of the Bronze Age settlement Kamennyi Ambar)] *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii* [Bulletin of archaeology, anthropology and ethnography], 2015, no. 1(28), pp. 4-14.
2. Dudkin V.P., Zharkyh M.I., Koshelev I.M. *Pervynna obrobka rezul'tativ magnitometrychnyh sposterezhen' na arheologychnyh pam'jatkah* [Preprocessing of results of magnetometric observations on the archaeological monuments]. AROIKS, issue 1, pp. 10-18.
3. Dudkin V.P., Koshelev I.N. *Kompleksnaya interpretatsiya magnitometricheskoy s"emki arkheologicheskikh pam'yatnikov* [Complex interpretation of magnetometric survey of archaeological monuments]. *Vostochno-evropeyskiy arkheologicheskiy zhurnal* [East-European archaeological journal], 2004, no. 3(16).
4. Kochnev V.A., Zdanovich G.B., Punegov B.N. *Opyt primeneniya 3D-tekhnologiy interpretatsii mag-*

nitnykh poley na arkheologicheskom ob'ekte "Arkaim" [The experiment in applying 3D technology of magnetic fields interpretation at the archaeological site "Arkaim"] *XI Ural'skaya molodezhnaya nauchnaya shkola po geofizike. Sbornik dokladov* [XI the Ural youth school of sciences on geophysics, 15-19 march 2010, Yekaterinburg. Collection of reports], Yekaterinburg, 2010.

5. Manshteyn A.K. *Maloglubinnaya geofizika. Posobie po spetskursu* [Low-deep geophysics. Manual on a special course]. Novosibirsk, 2002.

6. Murav'ev L.A., Noskevich V.V., Fedorova N.V. Rezul'taty magnitometricheskikh issledovaniy arkheologicheskikh pamyatnikov epokhi bronzy na Yuzhnom Urale [Magnetometric investigations results of South Urals' bronze age archaeological sites]. *Uralskiy geofizicheskiy vestnik* [Urals' geophysical bulletin], 2009, no. 1(14), pp. 44-49.

7. Noskevich V.V., Fedorova N.V., Vdovin A.G. *Geofizicheskie issledovaniya kurgannykh arkheologicheskikh kompleksov na Yuzhnom Urale* [Geophysical investigations of archaeological mound complexes on South Urals]. *Geofizika* [Geophysics Russia], 2015, no. 2, pp. 23-30.

8. Tarkhov A.G., Sidorova A.A. *O matematicheskoy obrabotke geofizicheskikh dannykh* [About mathematical processing of geophysical data]. *Izvestiya AN SSSR. Seriya Geofizika* [Proceedings of AS of USSR. Series Geophysical], 1960, no.10.

9. Tikhotskiy S.A. *Optimal'naya po Kolmogorovu-Vineru interpolyatsiya i fil'tratsiya anomal'nykh poley, izmerennykh na proizvol'nom mnozhestve tochek: teoreticheskie aspekty* [Optimal by Kolmogorov-Winer interpolation and filtering the anomalous fields measured on arbitrary set of points: theoretical aspects]. *Korrelyatsionno-statisticheskie metody obrabotki i interpretatsii geofizicheskikh dannykh: Uchebnoe posobie* [Correlation and statistical methods for processing and interpretation of geophysical data: Tutorial], Perm', 1998.

10. Fedorova N.V., Noskevich V.V., Ivanchenko V.S., Bebnev A.S., Malikov A.V. *Geofizicheskie metody issledovaniya arkheologicheskikh pam'yatnikov Sarym-Sakly i Vorovskaya Yama (Yuzhnyy Ural)* [Geophysical methods of research of archaeological monuments Sarym-Sakly and Vorovskaya Yama (southern Ural mountains)]. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik* [Urals' geophysical bulletin], 2013, no. 2 (22), pp. 46-53.

11. Cooper G.R.J. Gridding gravity data using an equivalent layer. Computer and Geosciences, vol. 26, no. 2, 2000, pp. 227-233. doi:10.1016/S0098-3004(99)00089-8 (Accessed 15 May 2015).

12. Cooper G.R.J. Fixed point inversion of geophysical data. Computer and Geosciences, vol. 28, issue 7, pp.799-808.

13. Guili Verbanac. On regional modeling of the main geomagnetic field. Geofizika, 2007, vol. 24, no. 1, pp. 1-27.

14. Jacobsen J.F. A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field maps. Geophysics, 1987, vol. 52, no. 8, pp. 1138–1148.